

I.M.W. Ekaputra

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Sanata Dharma
Jurusan Teknik Mesin
made@usd.ac.id

Arnold A.I. Litaay

Mahasiswa S1
Universitas Sanata Dharma
Jurusan Teknik Mesin
arnoldaudi@gmail.com

Budi Setyahandana

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Sanata Dharma
Jurusan Teknik Mesin
budisetya@usd.ac.id

PENGARUH KOMPOSISI 2,9% DAN 3,8% Si TERHADAP KEKUATAN LELAH BESI COR KELABU

The addition of Silicon (Si) on the gray cast iron can initiate graphite dispersion where the graphite becomes smaller and more evenly distributed. This study investigated the effect of Si concentration of 2.9% and 3.8% on the fatigue strength of the gray cast iron. The Si was added by the casting process with the open ladle method. The specimens were manufactured by following the ASTM E-466. Several tests such as tensile test, Brinell hardness test, and microstructure observation were conducted prior to the fatigue testing. The results showed that the Si concentration of 3.8% tended to increase the tensile strength up to 1.3%, the hardness up to 7.6%, and fatigue limit up to 10%. Moreover, the fatigue fractured specimen of 3.8% Si showed the combination of type A and type B graphite where graphite is smaller and more evenly distributed. In addition by applying the logistic equation, the fatigue strength can be predicted well.

Keywords: Gray Cast Iron, Graphite, Silicon, Fatigue Strength.

1. PENDAHULUAN

Besi cor kelabu atau *gray cast iron* (GCI) adalah salah satu logam cor paling populer digunakan dalam komponen-komponen teknik, seperti: rem cakram, silinder, dan *exhaust manifolds*, karena biayanya yang rendah (20-40% lebih rendah dari baja) dan jangkauan luas dari sifat mekanik yang diinginkan / dapat dicapai seperti kemampucoran yang baik, hanya dapat dibentuk secara pemessinan, dan ketahanan aus yang baik pada beberapa aplikasi [1]. Sifat mekanik GCI bergantung pada mikrostrukturnya yang terdiri dari grafit *lamellar* dan *matriks ferit* dan/ atau *perlit* yang terdistribusi ke seluruh produk cor setelah pemadatan [2]. Struktur tersebut menyebabkan permukaan patahan logam berwarna abu-abu. Dispersi serpih grafit menyumbang dua sifat lain pada GCI, yaitu kemampuan redaman getaran yang tinggi sehingga digunakan sebagai landasan mesin dan kualitas pelumas internal yang membuat logam cor dapat diolah sebagai bahan umum untuk struktur mesin-mesin konstruksi [3-4]. Kuantitas, distribusi, dan morfologi grafit bebas sangat mempengaruhi sifat mekanik GCI. Namun GCI memiliki kekuatan lelah yang sangat buruk yang menjadi masalah yang sering terjadi pada komponen-komponen teknik diatas. Rusak karena kegagalan lelah ini telah menjadi salah satu masalah utama yang membatasi masa pemakaian. Diperkirakan 50% - 90% kegagalan mekanis disebabkan oleh kegagalan lelah. Kegagalan lelah diawali dari retak mikro yang terinisiasi di ujung-ujung grafit *lamellar* bahkan pada tekanan siklus rendah [1,5-6]. Oleh karena itu, peningkatan kekuatan lelah dibutuhkan tanpa mengurangi sifat mekanik yang lainnya.

GCI yang diinokulasi menghasilkan nukleasi grafit *lamellar* serta diperoleh struktur *eutektik* yang stabil yang bebas dari karbida atau *ledeburit*. Grafit yang dihasilkan adalah Grafit tipe A. Inokulasi merupakan metode penambahan berbagai bahan nukleasi asing (umumnya besi silikon 75%) yang efektif untuk pembentukan struktur mikro homogen tanpa matriks sementit, pencegahan pelewatan-dingin (*under cooling*), dan penurunan kehadiran karbida bebas. Karbida bebas ini harus dihindari karena sangat merusak kemampuan mesin dari besi cor [7-9]. Inokulan juga menghasilkan partikel grafit yang lebih kecil, mengurangi kecenderungan untuk membentuk rongga penyusutan dan porositas selama pemadatan besi cair, mengurangi pembentukan inklusi non-logam, dan meningkatkan sifat mekanik (dari GCI). Setelah inokulasi, jumlah tonjolan-tonjolan grafit (*ridges*) yang terdistribusi baik dan merata meningkat secara signifikan. Ini menunjukkan bahwa isi grafit tipe A dalam matriks meningkat dan ukuran grafit menjadi lebih kecil, yang membantu menyebarkan tekanan terkonsentrasi dan mengurangi efek robeknya serpihan grafit besar dan

panjang (dalam menginduksi fraktur matriks) [10]. Penambahan silikon (*Si*) juga membuat ketahanan material terhadap korosi meningkat [11].

Dalam penelitian ini pengaruh penambahan *Si* 2,9% dan 3,8% diinvestigasi terhadap karakteristik lelahnya pada kurva kekuatan lelah/kekuatan tarik (S/S_u) vs. umur lelah (N). Pengujian lelah dilakukan berdasarkan standar ASTM E466. Sebagai tambahan, pengujian tarik, kekerasan, dan pengamatan struktur mikro juga dilakukan berdasarkan standar ASTM. Dari data pengujian lelah, penggunaan regresi garis digunakan untuk memprediksi umur lelah GCI.

2. METODE DAN BAHAN

Pengecoran dilakukan menggunakan standar komposisi FC 25 pada tanur induksi berkapasitas 1 ton. Komposisi kimia untuk FC25 dan setelah penambahan *Si* 2,9 % dan 3,8 % disajikan pada Tabel 1. Cetakan yang digunakan adalah cetakan pasir alam. Waktu peleburan 45 menit, dilanjutkan dengan penuangan cairan dari *ladle* selama ± 10 detik. Waktu pembongkaran cetakan 10 sampai 15 menit. Bahan baku peleburan adalah baja tua dan besi tua dengan penambahan karbon sesuai spesifikasi komposisi. Metode penuangan menggunakan metode *open ladle*. Perbedaan komposisi karbon pada Tabel 1 terjadi karena larutan padat tidak tercampur secara homogen.

2.1. Pengujian Tarik.

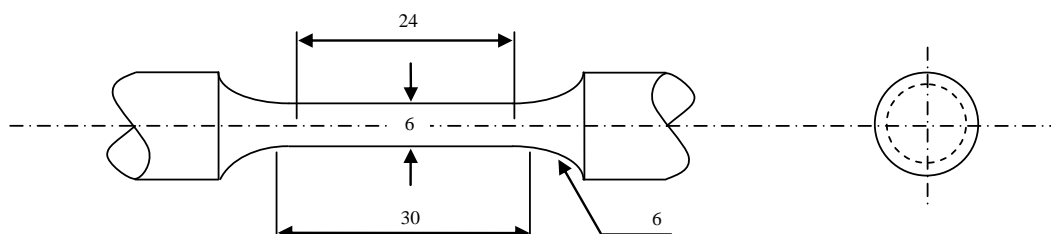
Standar uji tarik yang digunakan adalah ASTM E8/E8M – 09 [12]. Alat uji yang digunakan adalah UTC 10 ~ 200 kN Series dengan kecepatan penarikan (*cross head speed*) 5 mm/menit. Spesimen yang digunakan berbentuk silinder berjumlah 3 buah. Dimensi spesimen uji tarik terlihat pada Gambar 1.

2.2. Pengamatan Struktur Mikro.

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan Mikroskop Upright dengan lensa okuler HWF 15 \times dan lensa objektif M20/0,4 dengan total perbesaran 300 \times . Pengamatan struktur mikro diawali dengan perlakuan pengamplasan dari kasar ke halus untuk meratakan permukaan (80 μm , 120 μm , 250 μm , 500 μm , 650 μm , 1000 μm , dan 1500 μm). Kemudian menggosokkan permukaan spesimen datar dengan autosol hingga mengkilat. Permukaan spesimen ditetesi dengan larutan etsa yaitu HNO₃ 100% selama 15 detik untuk menampilkan batas butir. Selanjutnya, spesimen dibersihkan dengan larutan alkohol 70% dan dikeringkan menggunakan kain majun. Pengamatan struktur makro dilakukan pada permukaan patahan spesimen uji lelah.

Tabel 1. Komposisi kimia GCI (wt.%).

KOMPOSISI	Fe	S	Al	C	Ni	Si	Cr	Mn	P	Cu	Sn	Ca	Ti, V	Mo, B, Pb, Co.
<i>Si</i>														
FC	<i>Min</i>	<i>bal.</i>	0,1	-	3,2	-	1,7	-	0,6	0,15	-	-	-	-
25	<i>Max</i>	<i>bal.</i>	<i>max</i>	-	3,5	-	2,2	-	0,9	<i>max</i>	-	-	-	-
GCI														
2,9% <i>Si</i>	90,5	0,07	0,02	5,40	0,05	2,98	0,12	0,46	0,09	0,19	0,1	0,02	0,02	>0,01
GCI														
3,8% <i>Si</i>	90,4	0,04	0,03	4,75	0,05	3,83	0,11	0,45	0,09	0,18	0,02	>0,01	0,02	>0,01



Gambar 1. Dimensi spesimen uji tarik [12].

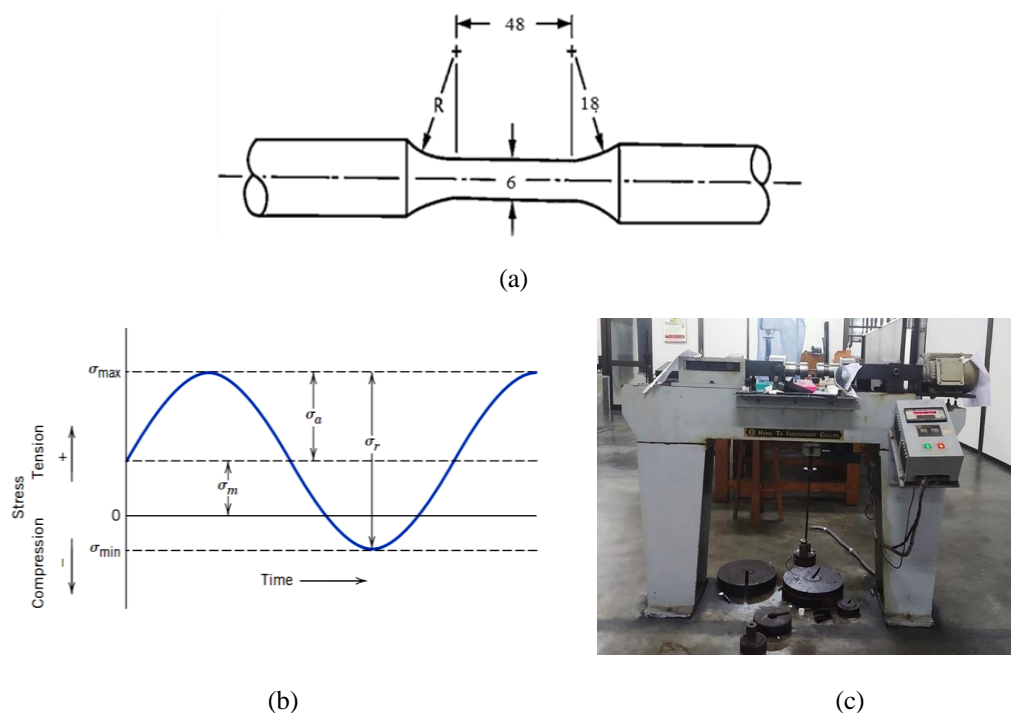
2.3. Pengujian Kekerasan

Standar uji kekerasan yang digunakan adalah ASTM E140-52 [13]. Alat yang digunakan adalah Brinell O.M.A.G Affri Italy Mod 100 MR dengan diameter bola baja berdiameter 2,5 mm; tekanan 187,5 kg; ditahan

selama 30 detik. Spesimen yang disediakan berjumlah 2 buah untuk masing-masing komposisi dengan 3 titik penekanan untuk setiap spesimennya. Sebelum diuji, spesimen diperlakukan sama seperti pengamatan struktur mikro namun tanpa proses etsa.

2.4. Pengujian Lelah

Salah satu faktor yang perlu diselidiki pada pengujian lelah adalah besar beban yang mempengaruhi batas lelah logam yang dihitung hingga mampu mencapai umur siklus (N_f) antara 10^7 atau 10^8 [6,14]. Pengujian lelah dilakukan menggunakan siklus putar berfrekuensi rendah dengan rentang frekuensi antara 10 hingga 200 Hz. Alat uji lelah yang digunakan adalah *Rotary Bending* 1800 rpm. Hasil pengujian lelah dinyatakan sebagai tingkat tegangan bolak-balik yang sesuai antara seribu hingga satu juta siklus putar (N) dengan perbandingan kekuatan tarik maksimalnya (S/S_u). Garis yang menghubungkan titik awal pemberian tegangan dan batas lelah adalah perkiraan yang digunakan untuk garis $S/S_u - N$ jika tidak ada data kelelahan aktual dari material [15]. Sehingga, umur lelah dapat diperkirakan sebagai jumlah siklus yang akan terjadi pada tingkat tegangan yang ditentukan [16]. Standar pengujian kelelahan yang digunakan adalah ASTM E466 [17]. Spesimen uji yang digunakan berjumlah 24 buah. Dimensi pengujian spesimen lelah menurut standar ASTM ditunjukkan pada Gambar 2(a). Gambar 2(b) merupakan kurva pembebanan uji lelah berbentuk sinusoidal. Kurva ini secara skematik mengilustrasikan variasi siklus tegangan (*stress*) dengan waktu yang menyebabkan kegagalan lelah yang dialami spesimen [16]. Gambar alat uji *rotary bending* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2(c).



Gambar 2. (a) Dimensi spesimen uji lelah [17], (b) pembebanan pada uji lelah [16], (c) alat uji lelah.

Pembebanan uji lelah pada Gambar 2(b) dapat dijelaskan pada Persamaan 1 sampai Persamaan 5, sebagai berikut:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (5)$$

dimana $\Delta\sigma$ adalah rentang tegangan (MPa), σ_a adalah amplitudo tegangan (MPa), σ_m adalah tegangan rata-rata (MPa), R adalah rasio tegangan, σ_{max} adalah tegangan maksimum (MPa), σ_{min} adalah tegangan minimum (MPa), dan A adalah rasio amplitudo [16].

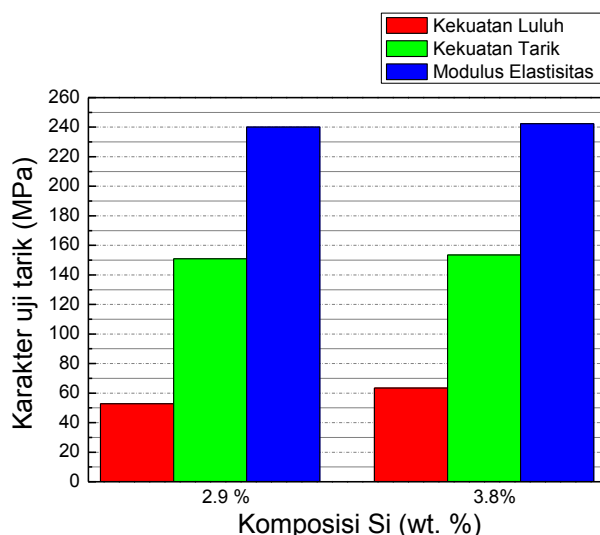
3. HASIL DAN DISKUSI

Komposisi yang digunakan pada pengecoran GCI mengikuti standar komposisi FC 25 yaitu sebesar 2% Si dan 3,4% C terbaca pada spektrometer selama proses peleburan. Penambahan Si sebesar 1 kg untuk mencapai komposisi 4% Si dan 2 kg untuk mencapai 7% Si dimasukkan ke dalam ladle berkapasitas 40 kg. Perhitungan awal Si didasarkan batuan Si yang ditambahkan adalah murni yaitu 100% Si. namun Si dalam batuan ternyata dicampurkan dengan Fe dengan komposisi umum yang digunakan Fe 25% dan Si 75%. Komposisi yang tidak sesuai ini menyebabkan penurunan komposisi Si pada spesimen uji. Komposisi yang telah dihitung ulang dengan penyesuaian FeSi yang dicampurkan sebesar 3,9% Si untuk penambahan 1 kg FeSi dan 5,8% Si untuk penambahan 2 kg FeSi. Hasil uji komposisi yang dilakukan di PT. ITOKOH CEPERINDO menunjukkan komposisi Si pada campuran 1 kg Si adalah 2,9% dan komposisi Si pada campuran 2 kg Si adalah 3,8%. Komposisi Si pada besi cor kalabu ini sangat berbeda jauh dari yang diharapkan. Si yang bercampur membantu pemisahan Fe dari Fe_3C sehingga lebih banyak perlit terbentuk. Si yang tidak tercampur dalam larutan padat masih berbentuk SiO_2 dan terbakar, sehingga keluar dalam bentuk asap sisa peleburan. Hal ini menunjukkan efisiensi Si yang tercampur dalam GCI sebesar 48%.

Spesimen uji yang telah dingin mengalami perubahan komposisi karbon menjadi 4,75% C pada spesimen yang berkomposisi Si lebih rendah dan 5,35% C pada spesimen yang berkomposisi Si lebih tinggi. Dari persentasi komposisi besi cor yang ada, besi cor masuk dalam katagori besi cor hipereutektik dimana persentase karbon lebih besar dari komposisi eutektiknya (4,12% C). Hal ini terjadi karena selama proses peleburan kurang homogennya larutan padat. Perubahan komposisi ini berdampak pada sifat mekanis GCI.

3.1 Pengujian Tarik

Perbandingan kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan modulus elastisitas pada uji tarik antara GCI dengan komposisi Si 2,9% dan 3,8% ditampilkan pada Gambar 3. Penentuan modulus elastisitas ditentukan berdasarkan dari kemiringan kurva pada area linear dan penentuan tegangan luluh dilakukan dengan menarik garis offset 0,2% dari garis linear kurva uji tarik. Kekuatan tarik diperoleh dengan mencari tegangan maksimum yang terjadi pada kurva uji tarik.



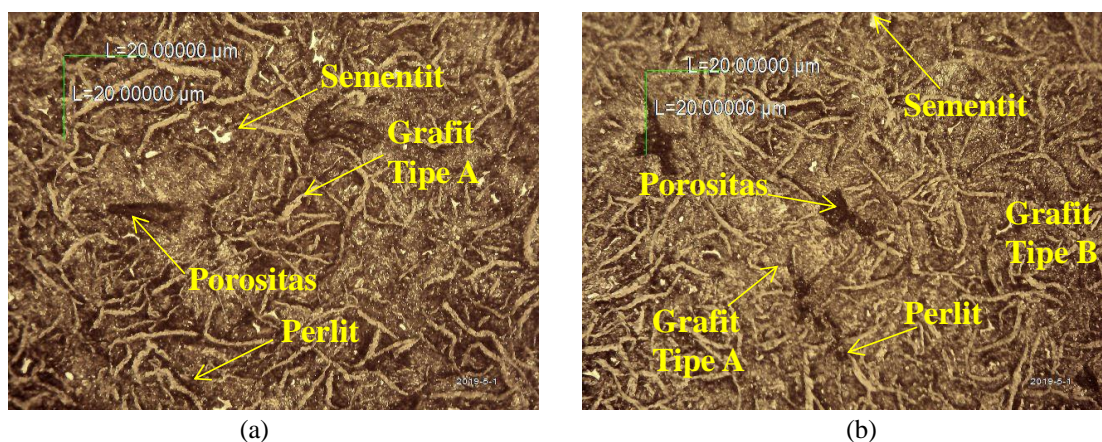
Gambar 3. Hasil uji tarik GCI berkomposisi 2,9% Si dan 3,8% Si

GCI berkomposisi 3,8% Si memiliki nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan GCI berkomposisi 2,9% sehingga lebih mampu menahan beban. Namun, nilai kekuatan tarik ini lebih kecil dibandingkan nilai kekuatan tarik yang ada pada standar FC 25. Hal ini disebabkan karena tingkat porositas yang terlihat pada pengamatan struktur mikro yang disajikan pada Gambar 4. GCI berkomposisi 3,8% Si memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan GCI berkomposisi 2,9% Si sehingga material tersebut lebih kaku.

3.2 Pengamatan Struktur Mikro

Struktur mikro hasil pengecoran GCI menunjukkan sedikit perbedaan. Pada komposisi 2,9% Si, GCI menunjukkan morfologi grafit tipe-A, tersaji pada Gambar 4(a). Grafit tipe-A menunjukkan grafit yang mempunyai dimensi yang panjang serta terdistribusi sebarang. Pada komposisi 3,8% Si, GCI menunjukkan morfologi grafit tipe-A dengan sedikit berkecenderungan kepada grafit tipe-B dikarenakan laju pendinginan yang lebih tinggi dengan waktu pembongkaran cetakan yang lebih cepat, tersaji pada Gambar 4(b). Grafit tipe-B menunjukkan grafit halus yang memusat yang disekelilingnya dilanjutkan oleh grafit *lamellar*. Sebagian besar morfologi permukaan tersusun dari grafit dan perlit. Namun, GCI 2,9% Si menunjukkan adanya lebih banyak fase *sementit*. Hal ini menunjukkan selama pemadatan, tingkat pendinginan tinggi dari udara diterapkan pada spesimen. GCI 3,8% Si memiliki ukuran grafit yang lebih kecil. Porositas tampak pada gambar mengurangi sifat mekanis GCI.

Struktur makro hasil perpatahan spesimen setelah dilakukan pengujian tarik dan pengujian leleh menunjukkan patah getas. Perpatahan yang terjadi akibat dislokasi slip, tersaji pada Gambar 5. Patah getas dilihat dari permukaan patahan yang rata dan tidak adanya perubahan bentuk spesimen. Pada Komposisi 2,9% Si terdapat tonjolan berbentuk kerucut-kerucut kecil yang menjorok kedalam. Pada komposisi 3,8% Si terdapat bentuk tonjolan yang sama, tetapi menjorok keluar.



Gambar 4. Struktur mikro GCI dengan komposisi (a) 2,9% Si, (b) 3,8% Si.



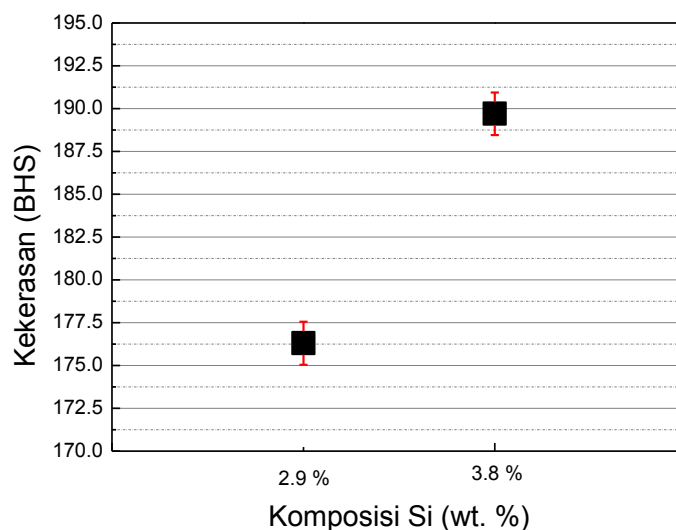
Gambar 5. Bentuk patahan spesimen uji leleh (a) komposisi 2,9% Si (b) komposisi 3,8% Si.

3.3 Pengujian Kekerasan

Hasil uji kekerasan GCI dengan variasi komposisi Si 2,9% dan 3,8% dapat dilihat pada Gambar 6. Dari pengujian didapatkan bahwa GCI yang memiliki komposisi 3,8% Si lebih keras karena memiliki nilai BHN lebih besar dibandingkan GCI berkomposisi 2,9% Si. Persebaran data untuk komposisi Si yang lebih tinggi sebesar 2% dan untuk komposisi Si yang lebih rendah sebesar 7,4%. Hal ini didapat dari perbandingan standar deviasi dengan nilai kekerasan rata-rata yang menunjukkan data hasil pengujian 3,8% Si lebih seragam dibandingkan 2,9% Si.

3.4 Pengujian Lelah

Penetapan beban awal dalam pengujian lelah ditetapkan sebesar 0,8 dari kekuatan tarik dari hasil pengujian tarik. Besarnya pembebanan pada komposisi *Si* 2,9% adalah sebesar 121,4 MPa dan pada komposisi *Si* 3,8% sebesar 122,9 MPa. Pemberian beban selanjutnya dilakukan dengan menurunkan pembebanan sebesar 0,7, 0,6, 0,55, dan 0,5 dari kekuatan tarik GCI. Tabel 2 menunjukkan pembebanan yang diberikan serta umur lelah yang terjadi pada material GCI.



Gambar 6. Hasil uji kekerasan Brinell GCI dengan komposisi 2,9% *Si* dan 3,8% *Si*.

Tabel 2. Data uji kelelahan GCI berkomposisi 2,9% *Si* dan 3,8% *Si*.

2,9% <i>Si</i>			3,8% <i>Si</i>		
TEGANGAN (MPa)	RASIO KEKUATAN TARIK (S/Su)	UMUR HINGGA PATAH (SIKLUS)	TEGANGAN (MPa)	RASIO KEKUATAN TARIK (S/Su)	UMUR HINGGA PATAH (SIKLUS)
121,4	0,8	44 000	122,9	0,8	277 033
		42 242			283 952
106,2	0,7	60 560	107,5	0,7	299 372
		48 996			519 169
91,0	0,6	111 247	92,2	0,6	822 800
		109 644			890 750
83,5	0,55	1,30E+06	84,5	0,55	≥2,35E+06
		988 791			≥2,0E+06
75,9	0,5	≥2,13E+06	76,8	0,5	≥1,05E+07
		≥2,20E+06			≥1,12E+07
		≥1,07E+07			≥ 2,35E+06
		≥1,01E+07			≥ 2,01E+06

Dari Tabel 2, batas lelah (*fatigue limit*) didapat dengan rasio pembebanan 0,5 untuk GCI 2,9% *Si* dan 0,55 untuk GCI 3,8% *Si*. Semua spesimen yang dikenakan rasio pembebanan lebih besar dari batas lelah telah patah akibat beban fluktuatif. Spesimen yang dikenakan pembebanan sesuai rasio pembebanan batas lelah tidak patah hingga sepuluh juta siklus. Jika spesimen dikenakan pembebanan yang lebih kecil dari batas lelah maka spesimen mampu menahan siklus pembebanan berulang hingga tak terhingga atau tidak akan patah.

Dari hasil pengujian lelah, GCI 3,8% *Si* memiliki kekuatan lelah yang lebih baik dibandingkan GCI

2,9% Si. Hal ini dilihat pada nilai siklus putar yang sama, besar rasio kekuatan tarik yang dapat ditahan komposisi 3,8% Si lebih besar. Peningkatan nilai kekuatan leleh GCI 3,8% Si untuk menahan tegangan geser berbanding lurus dengan nilai kekerasan dan kekuatan tarikanya. Jika dilihat dari pengamatan struktur mikro, peningkatan batas kelelahan ini terjadi karena GCI 3,8% memiliki grafit yang berukuran lebih kecil dan tersebar lebih halus sehingga perambatan ratak akibat konsentrasi tegangan pada ujung-ujung grafit lamellar lebih sukar terjadi.

Sebagai tambahan, dengan menggunakan data pengujian kelelahan, kekuatan dan umur leleh dapat diprediksi. Umur leleh pada GCI dapat diprediksi dengan menggunakan pendekatan regresi logistik sesuai Persamaan 6, sebagai berikut:

$$y = A_2 \frac{A_1 + A_2}{(1 + x/x_0)^p} \quad (6)$$

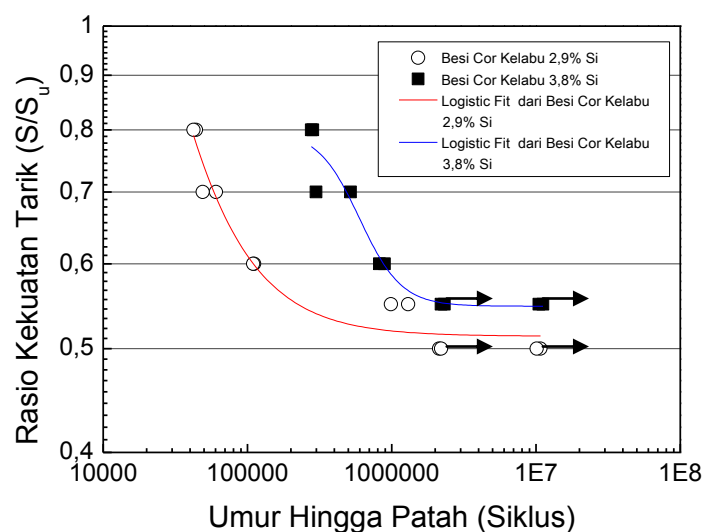
Nilai A_2 , A_1 , x_0 , dan p tersaji pada Tabel 3 dan Tabel 4. Dari hasil regresi yang dilakukan diperoleh nilai *adjustive R-square* 0,9. *Adj. R-square* menunjukkan kemampuan pendekatan garis untuk menginterpretasikan data variabel bebas (umur hingga patah) terhadap variabel terikat (rasio kekuatan tarik) sehingga dapat diperkirakan umur leleh saat mengalami pembebanan tertentu. Jika *adj. R-square* bernilai 1, berarti garis yang dibentuk sempurna dalam menginterpretasikan data. Regresi garis hasil pengujian leleh dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 3. Fungsi regresi logistik hasil pendekatan garis non-linier uji leleh GCI berkomposisi 2,9% Si.

Adj. R-Square = 0,94721	
Variabel	Nilai
A_1	167,198
A_2	0,513
x_0	220,989
p	1,218

Tabel 4. Fungsi regresi logistik hasil pendekatan garis non-linier uji leleh GCI berkomposisi 3,8% Si.

Adj. R-Square = 0,90036	
Variabel	Nilai
A_1	0,799
A_2	0,548
x_0	561778,126
p	3,002



Gambar 7. Kurva S/S_u vs umur hingga patah untuk komposisi 2,9% Si dan 3,8% Si

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan terhadap kekuatan lelah GCI berkomposisi 2,9% Si dan 3,8% Si, maka diperoleh beberapa kesimpulan antara lain:

1. FC 25 berkomposisi 2,9% Si menunjukkan morfologi grafit tipe-A sedangkan FC 25 berkomposisi 3,8% Si menunjukkan morfologi grafit tipe-A dengan sedikit berkecenderungan kepada grafit tipe-B. Permukaan GCI terdiri dari fase *perlite*, fase *sementite*, dan grafit. Komposisi 2,9% Si menunjukkan fase *sementite* yang lebih banyak dibandingkan komposisi 3,8% Si. Dari hasil pengamatan juga didapatkan pori yang terdapat pada struktur mikro kedua komposisi.
2. Komposisi Si yang lebih tinggi mempengaruhi sifat mekanis GCI, antar lain: kekerasan meningkat sebesar 7,6%, kekuatan tarik meningkat sebesar 1,3%, modulus elastisitas meningkat sebesar 1%, dan batas lelah meningkat sebesar 10%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] YANG, X., ZHIHUI, Z., JINTIAN, W., LUQUAN, R., “Investigation of nanomechanical properties and thermal fatigue resistance of gray cast iron processed by laser alloying”, *Journal of Alloys and Compounds*, n.626, pp. 260–263, 2015.
- [2] SARKAR, T., GOUTAM, S., “Influence of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties of austempered gray iron (AGI)”, *Materials Today: Proceedings*, n.4, pp. 10138–10143, 2017.
- [3] KALPAKJIAN, S., STEVEN, R.S., *Manufacturing engineering and technology*, 6 ed., Malaysia, Pearson Publications, 2013.
- [4] GROOVER, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing*, 4 ed., United States of America, John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [5] CHEN, Z., TI, Z., RUO-YU, Z., HAI-FENG, Z., SHU-CHAO, L., HONG, Z., “Improved fatigue wear resistance of gray cast iron by localized laser carburizing”, *Materials Science & Engineering A*, n.644, pp.1–9, 2015.
- [6] TAWAF, N., WAHYONO, S., ANINDITOM, P., “Analisis fatigue failure suhu rendah struktur batang duralumin dengan mesin siklus bending”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v.5, n.3, p.239-245, 2014.
- [7] FISCHER, S.F., HERGEN, G., ANDREAS, B.P., MATTHIAS, B., “Surface layer inoculation of a sand-cast hypoeutectic gray iron melt”, *Journal of Materials Processing Technology*, n.220, pp.251–256, 2015.
- [8] ELSAWY, E.E.T., EL-HEBEARY, M.R., EL MAHALLAWI, I.S.E., “Effect of manganese, silicon and chromium additions on microstructure and wear characteristics of gray cast iron for sugar industries applications”, *Wear An International Journal on The Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, n.S0043-1648 (17) 30231-4, pp.1 – 20, 2017.
- [9] RIPOSAN, I., CHISAMERA, M., STAN, S., BARSTOW, M., “Identifying chill tendency of cast iron melts by thermal analysis”, *International Journal of Cast Metals Research*, n.26, pp.152–159, 2013.
- [10] XUE, W., YAN, L., “Pretreatments of gray cast iron with different inoculants”, *Journal of Alloys and Compounds*, n.0925–8388(16)32085–0, pp. 1-21, 2016.
- [11] HADI, S., *Teknologi Bahan*, Yogyakarta, CV. Andi Offset, 2016.
- [12] ASTM E8/E8M – 09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Jul 15 12:39:35 EDT 2010.
- [13] ASTM 140 – 12b, Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness, ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Mar 21 23:08:49 EDT 2017.
- [14] VASKO, A., JURAJ, B., “Fatigue tests of nodular cast iron at low and high-frequency cyclic loading”, *Materials Today: Proceedings*, n.4, pp.5985–5988, 2017.
- [15] BANNANTINE, J.A., JESS, J.C., JAMES, L.H., *Fundamentals of metal fatigue analysis*, New Jersey, Englewood Cliffs, 1989.
- [16] CALLISTER, W.D., *Materials science and engineering*, 7 ed., United States of America, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [17] ASTM E466 – 07. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Jan 24 00:50:53 EST 2019.